

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-630654>

EDN: OACLUG



Обеспечение надёжности гидравлических систем строительно-дорожных машин

К.Г. Пугин^{1, 2}, И.Э. Шаякбаров¹¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия;² Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Современные строительные и сельскохозяйственные машины имеют в своём составе гидравлическую систему, которая обеспечивает управление рабочим оборудованием. Надёжность и высокий ресурс работоспособности гидросистемы определяет и надёжность всей машины в целом. Значительное количество причин выхода из строя гидросистем является загрязнение рабочей жидкости продуктами износа внутренних поверхностей гидромашин, внешние загрязнители, изменение свойств рабочей жидкости. Используемые в настоящее время фильтры не всегда могут произвести очистку рабочей жидкости вовремя эксплуатации машины. Степень очистки рабочей жидкости зависит не только от тонкости фильтрации, а также и от особенностей циркуляции рабочей жидкости. В настоящее время уделяется не достаточное внимание вопросам проектирования гидросистем, в частности, взаимному расположению отдельных элементов гидросистем.

Цель работы — повышение надёжности гидропривода строительных и сельскохозяйственных машин за счет оценки и предотвращения возможности формирования не полной циркуляции рабочей жидкости.

Методы. Объектом исследования выступает гидросистема, в которой установлен гидроцилиндр. Для оценки циркуляции рабочей жидкости по гидролиниям гидросистемы при работе гидроцилиндра использовали гидроцилиндр с диаметром поршня 100 мм, рукава высокого давления с внутренним диаметром 8 мм и длиной от 0,7 м до 8 м. В гидросистему для очистки рабочей жидкости был предусмотрен фильтр, который был установлен на сливной магистрали. Оценка была произведена расчетным методом.

Результаты. Установлено, что на качество очистки рабочей жидкости гидросистем при использовании в них гидроцилиндров влияет соотношение объемов в поршневой и штоковой полости к объемам в гидролиниях, которые подходят к данным полостям от распределителя. Для проверки возможности полной очистки рабочей жидкости использовался коэффициент удаленности. Предложено несколько технических решений позволяющих исключить формирования зон, в которых не происходит полная циркуляция рабочей жидкости

Заключение. Надёжность гидросистем строительных и сельскохозяйственных машин можно повысить за счет улучшения циркуляции рабочей жидкости. Для этого необходимо при проектировании гидравлических систем заранее учитывать особенности циркуляции рабочей жидкости от гидродвигателей до распределителей.

Ключевые слова: гидравлические системы; циркуляция; рабочая жидкость; надёжность; гидроцилиндр; гидропривод.

Как цитировать:

Пугин К.Г., Шаякбаров И.Э. Обеспечение надёжности гидравлических систем строительно-дорожных машин // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 2. С. 176–184. DOI: 10.17816/0321-4443-630654 EDN: OACLUG

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-630654>

EDN: OACLUG

Ensuring Reliability of Hydraulic Systems of Road Construction Machines

Konstantin G. Pugin^{1, 2}, Ilnur E. Shayakbarov¹¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;² Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Modern construction and agricultural machines have a hydraulic system that controls the working equipment. The reliability and long service life of the hydraulic system determines the reliability of the entire machine as a whole. Main of reasons for the failure of hydraulic systems are contamination of the working fluid with wear products of the internal surfaces of hydraulic machines, external contaminants, and changes in the properties of the working fluid. The filters currently used cannot always clean the working fluid during machine operation. The degree of cleaning of the working fluid depends not only on the fineness of filtration, but also on the features of the circulation of the working fluid circulation. Currently, insufficient attention is paid to the design of hydraulic systems, in particular to the mutual arrangement of individual elements of hydraulic systems.

AIM: Increasing the reliability of the hydraulic drive of construction and agricultural machines by assessing and preventing the possibility of forming incomplete circulation of the working fluid.

MATERIALS AND METHODS: The study object is a hydraulic system in which a hydraulic cylinder is installed. To evaluate the circulation of the working fluid in the hydraulic lines of the hydraulic system during the operation of the hydraulic cylinder operation, a hydraulic cylinder with a piston diameter of 100 mm, high-pressure hoses with an internal diameter of 8 mm and a length of 0.7 m to 8 m were used. A filter was provided in the hydraulic system for cleaning the working fluid, which was installed on the drain line. The assessment was made using the calculation method.

RESULTS: It was found that the quality of cleaning the working fluid of hydraulic systems when using hydraulic cylinders in them is affected by the ratio of the volumes in the piston and rod cavities to the volumes in the hydraulic lines that link these cavities with the distributor. It is proposed to use the distance coefficient to check the possibility of complete cleaning of the working fluid. Several technical solutions are proposed to eliminate the formation of zones in which complete circulation of the working fluid does not occur.

CONCLUSION: The reliability of hydraulic systems of construction and agricultural machines can be increased by improving the circulation of the working fluid. To do this, when designing hydraulic systems, it is necessary to take into account in advance the features of the circulation of the working fluid from hydraulic motors to distributors.

Keywords: hydraulic systems; circulation; working fluid; reliability; hydraulic cylinder; hydraulic drive.

To cite this article:

Pugin KG, Shayakbarov IE. Ensuring Reliability of Hydraulic Systems of Road Construction Machines. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(2):176–184. DOI: 10.17816/0321-4443-630654 EDN: OACLUG

Submitted: 01.05.2024

Accepted: 25.03.2025

Published online: 22.05.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Для достижения национальных целей развития, исходя из стратегий социально-экономического развития Российской Федерации, принят ряд государственных программ, нацеленных на развитие транспортной инфраструктуры, обороноспособности страны, сельского хозяйства, жилищного строительства, восстановление и социально-экономическое развитие Донецкой Народной Республики, Луганской Народной Республики, Запорожской области и Херсонской области. При решении задач, поставленных в государственных программах, требуется использование большого количества строительных, сельскохозяйственных и специальных машин (СМ) различного назначения, которые должны эксплуатироваться в сложных природно-климатических условиях. Большие объёмы работ и сжатые сроки реализации государственных программ предъявляют повышенные требования к надёжности машин. Выполнение многих видов работ связано с сезонностью, что дополнительно ограничивает сроки производственной эксплуатации. Удалённость объектов строительства от баз обслуживания техники также предъявляет, дополнительные требования к обеспечению надёжности и увеличению ресурса работы. При выходе СМ из строя увеличивается время ремонта СМ, что может привести к срыву сроков выполнения работ.

Одной из основных систем строительных, сельскохозяйственных и других специализированных машин, включая военные, является гидравлическая система. Для обеспечения безотказного функционирования этой системы, необходимо учитывать множество факторов, которые взаимосвязаны между собой и зачастую имеют случайный характер. Разнообразие факторов, которые характеризуют условия эксплуатации и которые оказывают влияние на надёжность, сводятся к двум группам: внутренние и внешние. Внутренние факторы включают в себя качество и состояние компонентов системы, таких как насосы, клапаны, гидроцилиндры и трубопроводы. Неправильная установка или износ этих компонентов может привести к утечкам, снижению производительности или поломке системы в целом. Внешние факторы включают в себя условия эксплуатации, в которых машина работает, такие как температура окружающей среды, загрязнение и влажность. Высокая температура или наличие агрессивных веществ в окружающей среде могут привести к деградации масла и повреждению компонентов системы. Кроме того, недостаточное обслуживание и неправильная эксплуатация также могут оказывать негативное влияние на надёжность гидравлических систем. Регулярная проверка и замена фильтров, очистка системы от загрязнений и правильное использование масла и гидравлических жидкостей являются важными мерами по поддержанию надёжности системы [1–3]. Для обеспечения надёжного и безотказного функционирования гидравлических систем СМ также рекомендуется

проводить регулярное обучение и подготовку операторов. Неправильное использование системы или неправильное выполнение операций может привести к излишнему напряжению на компоненты системы и, в конечном счете, к их поломке. Таким образом, надёжность гидравлических систем СМ зависит от множества факторов, включая качество компонентов, условия эксплуатации, обслуживание и правильное использование системы. При учёте всех этих факторов можно обеспечить стабильную работу системы и предотвратить внезапные выходы из строя, снижение ресурса наработки до капитального ремонта машины [4–7].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка технических условий повышения надёжности гидравлических систем строительных, сельскохозяйственных и специализированных машин на основе анализа циркуляции рабочей жидкости.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Объектом исследования выступила гидросистема, в которой установлен гидроцилиндр. Для оценки циркуляции рабочей жидкости по гидролиниям гидросистемы при работе гидроцилиндра использовался гидроцилиндр с диаметром поршня 100 мм, рукава высокого давления с внутренним диаметром 8 мм и длиной от 0,7 м до 8 м. В гидросистеме для очистки рабочей жидкости был предусмотрен фильтр, который был установлен на сливной магистрали. Оценка объёмов рабочей жидкости была произведена расчётным методом.

Критерии соответствия

При анализе циркуляции рабочей жидкости принято допущение, что течении жидкости в гидролиниях осуществляется постоянно в ламинарном режиме, перемешивание отдельных, соседних слоев не учитывается. При моделировании не учитывались: жёсткость материалов гидролиний; изменение давления рабочей жидкости; скорость движения жидкости в гидролиниях при перемещении поршня.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

В гидроприводе СМ находится множество элементов, обеспечивающие те или иные функции, соответственно общая надёжность гидропривода складывается из надёжности всех ее элементов. Но в то же элементы гидросистем довольно требовательны к чистоте рабочей

жидкости, несмотря на высокую наработку до отказа, данные элементы могут быть выведены из строя довольно быстро. Около 80 % отказов гидропривода связано с загрязнением рабочей жидкости, а это значит, что обеспечить надёжность гидропривода строительно-дорожных машин можно посредством обеспечения контроля за состоянием рабочей жидкости [8–10].

Изучением работы гидравлических систем занимаются многие ученые (В. В. Кузнецов К. А. Ананьев, В.Ф. Ковалевский, О. И. Попова, М. И. Попова, С. Л. Новокшенов и др.). Согласно исследованиям, основанным на статистических данных, полученных от предприятий, эксплуатирующих строительно-дорожные, железнодорожные, лесовозные и сельскохозяйственные машины, наиболее подверженными отказу элементами гидропривода являются гидравлические линии, насосы, уплотнения, гидромоторы и распределяющие устройства. Данные, используемые авторами для своих исследований, были получены при эксплуатации техники в неблагоприятных условиях, особенно по климатическим показателям и запыленности. На основании полученных результатов авторы сделали выводы, что количество отказов гидравлических линий зависит от культуры эксплуатации техники и продуманности размещения гидравлических линий при проектировании (трение рукавов высокого давления об элементы машин), а также от состояния эксплуатационных материалов, в частности, состояние рабочей жидкости [10–19].

Стоит отметить, что авторами настоящей статьи не рассматривается такой фактор, как взаимное расположение компонентов гидравлической системы, в частности удалённость одного элемента относительно другого. К примеру, взаиморасположение элементов гидросистемы на современных бульдозерах или мини-погрузчиках можно охарактеризовать как компактное, элементы находятся в непосредственной близости друг от друга. Однако имеются виды техники, в которой компоненты гидравлики расположены на большом удалении, например, экскаваторы, автогрейдеры и т.д.

Взаимное расположение элементов гидросистемы в той или иной степени влияет на циркуляцию рабочей жидкости внутри гидравлической системы. В свою очередь «правильная» циркуляция рабочей жидкости в системе обеспечивает своевременное удаление загрязнителей различного рода от мест их образования и очистку рабочей жидкости, тем самым повышая срок службы агрегатов и повышая надёжность техники в целом. Для пояснения рассмотрим движение рабочей жидкости по гидролиниям между отдельными компонентами на примере гидропривода, имеющего в своем составе гидроцилиндр рис. 1.

Движение рабочей жидкости в гидравлических системах с гидроцилиндрами имеет возвратно-поступательный характер. Для осуществления движения штока гидроцилиндра, рабочая жидкость нагнетается и сливается

из соответствующих полостей гидроцилиндра. На сливной линии СЛ устанавливается фильтр Φ , который очищает рабочую жидкость перед её сливом в гидробак Б. При удалении гидроцилиндра от распределителя, при котором объем жидкости V_1 в трубопроводе НЛ стает больше, чем объем жидкости V_3 в поршневой полости гидроцилиндра Ц, при втягивании штока объем жидкости V_1 из трубопровода НЛ будет вытесняться рабочей жидкостью из поршневой полости в направлении распределителя и фильтра. В виду того, что $V_1 > V_3$, объем жидкости V_3 только частично займет объем трубопровода НЛ. При последующем выдвигании штока, объем V_3 (который был вытеснен в трубопровод из поршневой полости гидроцилиндра) находящийся в трубопроводе НЛ будет вытеснен из трубопровода НЛ обратно в поршневую полость гидроцилиндра.

Такое же движение рабочей жидкости будет характерно и для рабочей жидкости находящейся в штоковой полости гидроцилиндра (при $V_2 > V_4$). Таким образом, формируется замкнутый (тупиковый) контур гидросистемы, при котором рабочая жидкость не проходит через фильтр и не очищается от загрязнений, которые попадают в гидроцилиндр извне и при износе элементов гидроцилиндра.

При такой организации движения рабочей жидкости, частицы загрязнений, не будут уловлены фильтрующим

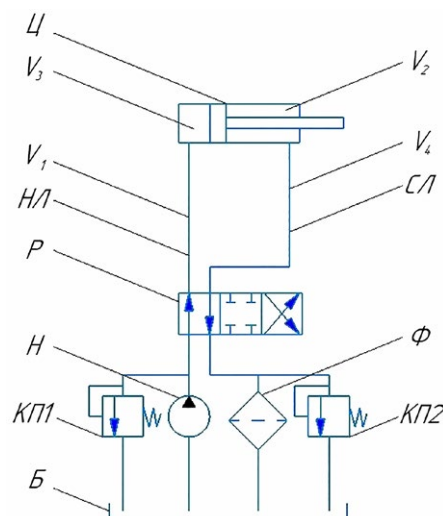


Рис. 1. Гидравлическая схема с гидроцилиндром: Б — гидробак; Н — насос, Р — гидрораспределитель, НЛ — напорная гидролиния, Ц — гидроцилиндр, СЛ — сливная гидролиния, Φ — фильтр, КП1 и КП2 — предохранительные клапаны; V_1 — объем жидкости в напорной гидролинии, V_2 — объем жидкости в сливной гидролинии, V_3 — объем поршневой полости гидроцилиндра; V_4 — объем штоковой полости гидроцилиндра.

Fig. 1. Hydraulic circuit with a hydraulic cylinder: Б: a hydraulic tank; Н: a pump, Р: a hydraulic distributor, НЛ: a pressure hydraulic line, Ц: a hydraulic cylinder, СЛ: a drain hydraulic line, Φ : a filter, КП1 and КП2: safety valves; V_1 : volume of liquid in the pressure hydraulic line, V_2 : volume of liquid in the drain hydraulic line, V_3 : volume of the piston cavity of the hydraulic cylinder; V_4 : volume of the rod cavity of the hydraulic cylinder.

элементом фильтра Ф гидросистемы. Накапливаясь в данной части гидросистемы, частицы загрязнений будут увеличивать скорость износа элементов гидроцилиндра. Значительное накопление загрязнителя по объёму может привести к внезапному выходу из строя гидроцилиндра.

Основные результаты исследования

Циркуляцию рабочей жидкости в отдельных контурах гидросистем, на предмет поддержания необходимого уровня её чистоты, можно оценить на этапе проектирования, используя отношения объёмов поршневой и штоковой полостей гидроцилиндра к объёмам соответствующих гидролиний. Для такой оценки нами предлагается введение коэффициента удалённости гидравлического компонента $k_{удал}$, позволяющего определить зоны гидросистем с неполной циркуляцией рабочей жидкости. Это даёт возможность на этапе проектирования и трассировки гидравлических линий внести необходимые изменения и исключить формирование «тупиковых» зон за счёт формирования дополнительных линий движения рабочей жидкости или изменения расположения распределительной аппаратуры, фильтрующих элементов.

Коэффициент удалённости $k_{удал}$ представляет собой отношение объёма жидкости в напорной линии гидросистемы (V_1) к объёму жидкости в исполнительном органе (V_3), что позволяет определять вероятность образования участков гидравлической системы, где при работе машины возможно появление недостаточной циркуляции рабочей жидкости — «тупиковых» зон.

Коэффициент удалённости можно использовать как при расчёте работы гидроцилиндра на выдвижение штока (рис. 2), так и при его втягивании (рис. 3).

При расчёте коэффициента в процессе выдвижения штока определяется отношение объёмов жидкостей, заключённых в поршневой полости гидроцилиндра и в рукаве высокого давления от гидрораспределителя до гидроцилиндра:

$$k_{удал} = \frac{V_1}{V_3} = \frac{S_{рвд} \cdot L_{рвд}}{S_{порш} \cdot L_{ход}} = \frac{D_{рвд}^2 \cdot L_{рвд}}{D_{внут}^2 \cdot L_{ход}}$$

где V_1 — объём напорной линии; V_3 — объём поршневой полости в гидроцилиндре; $D_{внут}$ — внутренний диаметр гидроцилиндра; $L_{ход}$ — ход поршня; $D_{рвд}$ — внутренний диаметр рукава высокого давления; $L_{рвд}$ — длина гидролинии от гидрораспределителя до гидроцилиндра.

При расчёте коэффициента удалённости в момент втягивания штока (рис. 3) необходимо учитывать участок штока в штоковой полости гидроцилиндра.

В этом случае расчётная формула для определения коэффициента удалённости примет следующий вид:

$$k_{удал} = \frac{V_1}{V_3} = \frac{S_{рвд} \cdot L_{рвд}}{S_{порш} \cdot L_{ход}} = \frac{D_{рвд}^2 \cdot L_{рвд}}{(D_{внут}^2 - d_{ш}^2) \cdot L_{ход}}$$

где V_1 — объём напорной линии; V_3 — объём поршневой полости в гидроцилиндре; $D_{внут}$ — внутренний диаметр гидроцилиндра; $d_{ш}$ — диаметр штока гидроцилиндра; $L_{ход}$ — ход поршня; $D_{рвд}$ — внутренний диаметр рукава высокого давления; $L_{рвд}$ — длина гидролинии от гидрораспределителя до гидроцилиндра.

Для наглядности произведем расчёт системы, включающей себя гидравлическую линию и исполнительный орган в виде гидроцилиндра двухстороннего действия (см. рис. 1). Вычисление будет производиться для варианта с выдвижением штока гидроцилиндра, а в качестве

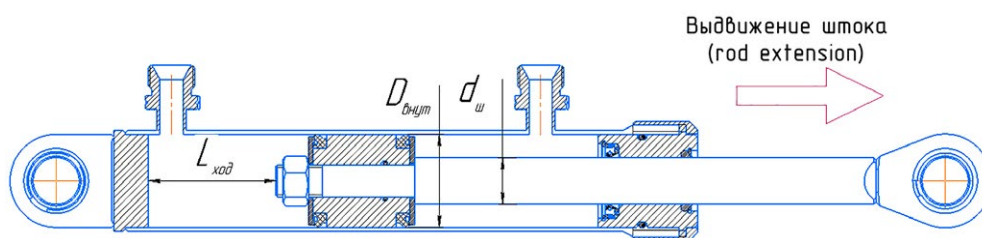


Рис. 2. Гидроцилиндр при выдвижении штока.

Fig. 2. The hydraulic cylinder when the rod is extended.

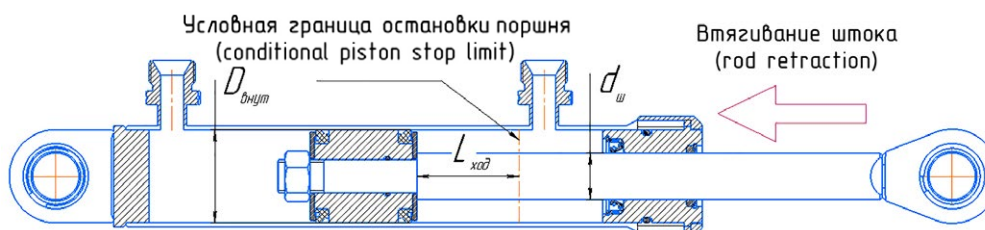


Рис. 3. Гидроцилиндр при втягивании штока.

Fig. 3. The hydraulic cylinder when the rod is retracted.

исходных данных принимаем диаметр поршня гидроцилиндра 100 мм, ход поршня варьируется от 50 до 200 мм, гидравлическая линия от распределителя до исполнительного органа представлена рукавом высокого давления (РВД), диаметр которого составляет 8 мм, а длина линии варьируется от 500 до 3000 мм, что соответствует длине РВД различных типов техники (погрузчик, бульдозер, экскаватор).

Полученные в ходе подстановки и расчёта в формулу (1) данные сведём в табл. 1.

Из расчёта можно сделать выводы, что при заданных условиях вероятность возникновения затрудненной циркуляции минимальна при больших значениях хода поршня и малых длин РВД. Полученная вероятность затрудненной циркуляции, имеет физический смысл, который показывает какой объём (в процентах) жидкости не будет проходить в сливную линию гидросистемы и не получит очистку. При этом, максимальная вероятность возникает при малых значениях хода поршня и больших длин РВД (ход поршня 50 мм и длинная РВД 8000 мм). Возможен случай, при котором очистка рабочей жидкости из полости цилиндра не будет проходить очистку на фильтре вследствие её возвратно поступательного движения из полости в РВД и обратно (ход поршня 50 мм и длинная РВД 8000 мм). Это приведёт к накоплению частиц износа в полостях гидроцилиндра, ускорится процесс «старения» рабочей жидкости, снизятся смазочные свойства. Вместе с тем, будет нарушен тепловой баланс на этом участке, так как гидравлическая жидкость не будет передавать тепло в атмосферу через радиатор охлаждения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из решений проблемы затрудненной циркуляции рабочей жидкости может быть установка

дополнительных или более эффективных фильтрующих элементов в гидравлическую систему. Это позволит более эффективно задерживать частицы и предотвращать их негативное воздействие на приводы. Также, важно регулярно проверять и обслуживать гидравлическую систему, чтобы обнаружить и устранить возможные проблемы с циркуляцией. Регулярная замена фильтрующих элементов и контроль уровня чистоты рабочей жидкости помогут поддерживать оптимальное функционирование системы. В идеале, разработчики гидравлических систем должны учитывать возможность неполноценной циркуляции при проектировании и выборе компонентов системы. Это поможет избежать проблем, связанных с протяженностью гидролиний и обеспечит более эффективную работу системы в целом.

Кроме того, затруднённую циркуляцию рабочей жидкости можно избежать путём конструктивных изменений в гидравлической системе машины.

Одним из вариантов изменения конструкции гидравлической системы для минимизации влияния затрудненной циркуляции является установка дополнительных фильтрующих элементов. На рис. 4 представлена условная схема оборудования для фильтрации рабочей жидкости в узлах с затрудненной циркуляцией рабочей жидкости. В данной компоновке присутствуют обратные клапаны 2, которые направляют потоки жидкости, вытесняемой из гидроцилиндра 1, через фильтры 3, исключая реверс потока через фильтроэлемент. Рабочая жидкость, вытесняемая из гидроцилиндра, очищается в фильтре, что снижает интенсивность износа и вероятность выхода из строя узла.

При изучении процесса формирования затрудненной циркуляции рабочей жидкости в гидросистемах системе было выявлено, что затруднённый участок характеризуется отношением объёмов жидкости, заключенной

Таблица 1. Расчёт вероятности неполной циркуляции
Table 1. Calculation of the probability of incomplete circulation

Ход поршня, мм	Объём вытесняемой жидкости, мм ³	Длина РВД, мм	Объём полости РВД, мм ³	Вероятность, %
50	392500	700	35168	9
50	392500	1500	75360	19
50	392500	3000	150720	38
50	392500	8000	401920	102
100	785000	700	35168	4
100	785000	1500	75360	10
100	785000	3000	150720	19
100	785000	8000	401920	51
200	1570000	700	35168	2
200	1570000	1500	75360	5
200	1570000	3000	150720	10
200	1570000	8000	401920	25

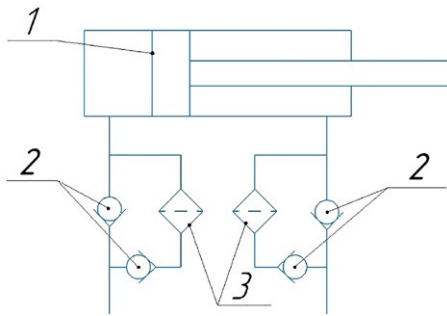


Рис. 4. Установка дополнительных фильтрующих элементов: 1 — гидроцилиндр; 2 — обратные клапана; 3 — фильтрующие элементы.

Fig. 4. Installation of additional filtering elements: 1: a hydraulic cylinder; 2: check valves; 3: filter elements.

в рабочей полости и объёмом жидкости в гидролинии, ведущей от органа управления до исполнительного органа.

Следовательно, можно сделать вывод, что для улучшения процесса циркуляции рабочей жидкости на данном участке, необходимо уменьшить объём жидкости в гидролинии. Логичным шагом для этого будет перенос гидрораспределителя как можно ближе к исполнительному органу (рис. 5).

В этом случае практически вся жидкость, поступающая из насоса к распределителю, будет при всех режимах работы попадать в гидробак, проходя через фильтр. Это позволит существенно повысить качество очистки гидравлической жидкости в части наличия механических примесей, что в свою очередь повысит ресурс элементов гидросистемы и обеспечит надёжность работы гидравлической системы в целом.

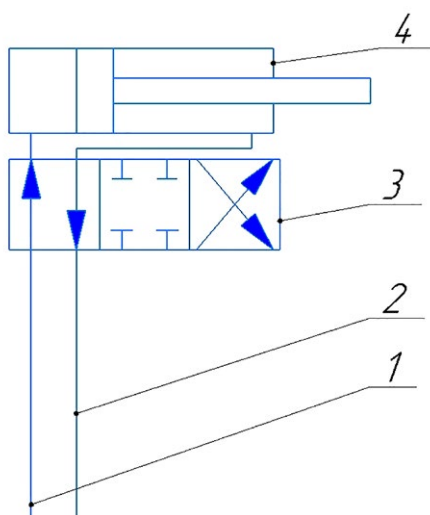


Рис. 5. Изменение месторасположения органа управления: 1 — напорная линия; 2 — сливная линия; 3 — гидрораспределитель; 4 — гидроцилиндр.

Fig. 5. Changing the location of the control element: 1: a pressure line; 2: a drain line; 3: a hydraulic distributor; 4: a hydraulic cylinder.

Управление гидрораспределителем при штатном расположении происходит в ручном режиме при помощи рычагов. При переносе распределителя управление будет производиться при помощи электромагнитов по сигналу от джойстика. Для этого необходимо обеспечить укладку дополнительных электролиний или же обеспечить беспроводную работу данного узла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение надёжности гидросистем может быть обеспечена использованием качественных конструкционных материалов, эффективных методов эксплуатации СМ включая техническое обслуживание. Одной из задач, которую необходимо решить при производственной эксплуатации это обеспечение чистоты рабочей жидкости, которая в значительной степени определяет надёжность и ресурс работы гидравлической системы. При работе гидропривода рабочая жидкость должна проходить через фильтры, при неполной циркуляции рабочей жидкости часть объёма рабочей жидкости не проходит через фильтры, накапливая в своём составе загрязнители. Увеличение загрязнителей в составе рабочей жидкости в разы повышает скорость износа в элементах гидросистемы.

Проблему циркуляции рабочей жидкости можно исключить ещё на этапе проектирования. Достаточно при расчётах гидравлических систем заранее учитывать вопрос недостаточной циркуляции в местах расположения исполнительных органов гидравлических систем новых строительно-дорожных и транспортно-технологических машин. Для этого необходимо производить предварительный расчёт коэффициента удалённости $k_{удал}$. Данный коэффициент позволит определить вероятность образования участка гидросистемы с недостаточной циркуляцией рабочей жидкости. Исключение появления данных участков в гидравлических системах поможет сохранить чистоту рабочей жидкости и продлить срок службы гидравлической системы без использования дополнительных технических устройств.

Ввиду того что в расчёте предложенного коэффициента удалённости узла не учитывались параметры потока рабочей жидкости, влияние скорости и давления предложенная методика его расчёта носит предварительный характер. Однако, как показали натурные испытания на стенде и моделирование в циркуляции рабочей жидкости в гидролиниях в ANSYS Fluent расхождение между расчётными и натурными испытаниями составили не больше 4–6%.

Предложенные технические решения по организации полной циркуляции рабочей жидкости позволяют повысить степень очистки рабочей жидкости и обеспечить повышение надёжности гидросистемы. Это будет актуально для СМ, работающих в запылённых условиях промышленных предприятий, в условиях пустынь, подземных выработок.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. К.Г. Пугин — формирование идеи оценки возникновения затрудненной циркуляции рабочей жидкости и ее влияние на надежность гидросистемы, написание текста и редактирование статьи; И.Э. Шаякбаров — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи проведение расчетов; все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один внешний рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: K.G. Pugin: development of the idea of assessing the occurrence of difficult circulation of the working fluid and its impact on the reliability of the hydraulic system, writing and editing the text of the manuscript; I.E. Shayakbarov: literature review, collection and analysis of literary sources, preparation and writing of the text of the manuscript, calculations. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or non-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: In creating this work, the author did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement: Editor's policy in terms of collective use of data is not applicable to this paper, any new data are neither collected nor created.

Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review: The paper was submitted to the journal in a proactive way and was reviewed according to the standard procedure. One external reviewer, a member of the editorial board and the scientific editor of the journal took part in the review.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Pugin KG, Shajakbarov IJe. Improving the reliability of hydraulic systems of construction and road machines operated in the winter period in the Arctic zone of the Russian Federation. *Bulletin of the Saint Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and technical sciences*. 2022;(1):154–162. (In Russ.) doi: 10.46418/2079-8199_2022_1_23
2. Maslov NA. Analysis of failures of plastic hydraulic machines of railway equipment caused by contamination of solid particles, dehydration, oil humidity and use of non-solid oils. *Bulletin of the Siberian State Transport University*. 2017;(3):55–64. (In Russ.) EDN: ZSMGZD
3. Kotomchin AN, Kornejchuk NI. The influence of operating conditions of road construction machines and specialized vehicles on the service life of their components and assemblies. *Technical service of machines*. 2019;(2):135–142. (In Russ.) EDN: QWSLRJ
4. P'janzov SV. Methodology for dynamic assessment of technical condition of volumetric hydraulic drives. *News of the Saint Petersburg State Agrarian University*. 2019;(2):184–191. (In Russ.) doi: 10.24411/2078-1318-2019-12184
5. Sazonova, SA. Evaluation of the reliability of hydraulic systems based on performance indicators. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2016;(1):37–39. (In Russ.) EDN: WJKOMH
6. Fedorov VK, Ivanov SP. Improving the reliability of hydraulic drives for road construction machines. *Construction and road machinery*. 2021;(2):12–17. (In Russ.) doi: 10.31044/1684-2561-2022-0-10-31-34
7. Miller AP. Improving the reliability of hydraulic systems of construction and road machinery. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2020;(4):45–51. (In Russ.) doi: 10.15593/24111678/2020.04.05
8. Ng F, Harding JA, Glass J. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017;(83):176–193. doi: 10.1016/j.ymssp.2016.06.006
9. Cheng ChF, Rashidi A, Davenport MA, Anderson DV. Activity analysis of construction equipment using audio signals and support vector machines. *Automation in construction*. 2017;81:240–253. doi: 10.1016/j.autcon.2017.06.005
10. Avrunin G.A., Moroz I.I. Analysis of the use of working fluids in volumetric hydraulic drives of mobile machines. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic University"*. 2018;38:73–80. EDN: NUUAVP
11. Aliboev BA. Reliability of tractor hydraulic systems in the context of the cleanliness of the working fluid. *Tractors and agricultural machinery*. 2015;(6):26–29. (In Russ.) EDN: TXOXZZ
12. Savić V., Knežević D., Lovrec D., et al. Determination of pressure losses in hydraulic pipeline systems by considering temperature and pressure. *Strojnikivestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2009;55(4):237–243.
13. Reliability-based maintenance scheduling of hydraulic system of rotary drilling machines / Mohammad Javad Rahimdel, Mohammad Ataei, Reza Khalokakaei, Seyed Hadi Hoseinie. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013;23(5):771–775. doi: 10.1016/j.ijmst.2013.08.023
14. Sliwinski P. The methodology of design of axial clearances compensation unit in hydraulic satellite displacement machine and their experimental verification. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2019;19(4):1163–1182. doi: 10.1016/j.acme.2019.04.003

15. Addison A, Vacca A, Cristofori D. Active Vibration Damping in Hydraulic Construction Machinery. *Procedia Engineering*. 2017;176:514–528. doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.351

16. Energy saving of cutterhead hydraulic drive system of shield tunneling machine / Hu Shi, Huayong Yang, Guofang Gong, Huaiyin Liu, Dianqing Hou. *Automation in Construction*. 2014;37:11–21. doi: 10.1016/j.autcon.2013.09.002

17. Muraki M, Kinbara E, Konishi T. A laboratory simulation for stick-slip phenomena on the hydraulic cylinder of a construction

machine. *Tribology international*. 2003;36(10):739–744. doi: 10.1016/S0301-679X(03)00054-9

18. Min' NCh. Improving the reliability of hydraulic systems of construction machines using remote diagnostics. *Gruzovik*. 2022;(11):32–34. (In Russ.) doi: 10.36652/1684-1298-2022-11-32-34

19. Zorin VA, Min' NCh, Nefelov IS. Improving the reliability of hydraulic systems of construction machines using technical diagnostics methods. *Vestnik MADI*. 2020;(3):24–30. (In Russ.) EDN: WLLLJA

ОБ АВТОРАХ

*** Шаякбаров Ильнур Эльмарович,**

старший преподаватель кафедры «Автомобили и технологические машины»;

адрес: Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр-кт, д. 29;

ORCID: 0009-0009-8829-2901;

eLibrary SPIN: 6547-2428;

e-mail: ilnur199459@gmail.com

Пугин Константин Георгиевич,

д-р техн. наук,

доцент кафедры «Автомобили и технологические машины»;

ORCID: 0000-0002-1768-8177;

eLibrary SPIN: 7972-1668;

e-mail: 123zzz@rambler.ru

AUTHORS' INFO

*** Ilnur E. Shayakbarov,**

senior lecturer at the Automobiles and Technological Machines Department;

address: 29 Komsomolsky ave, Perm, Russia, 614990;

ORCID: 0009-0009-8829-2901;

eLibrary SPIN: 6547-2428;

e-mail: ilnur199459@gmail.com

Konstantin G. Pugin,

Dr. Sci. (Engineering),

Assistant Professor at the Automobiles and Technological Machines Department;

ORCID: 0000-0002-1768-8177;

eLibrary SPIN: 7972-1668;

e-mail: 123zzz@rambler.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author